

DOI: <http://dx.doi.org/10.30827/cuadgeo.v59i2.9519>SEGUEL, M.A.; SAMANIEGO, H. (2020). Observación espacial y análisis de la relación entre las emisiones...
Cuadernos Geográficos 59(2), 73-92

73

Observación espacial y análisis de la relación entre las emisiones atmosféricas de CO₂ y el tamaño de las ciudades en Chile

MARCELA ANTONIA SEGUEL ABURTO¹ | HORACIO SAMANIEGO²

Recibido: 06/06/2019 | Aceptado: 10/09/2019

Resumen

Las tasas de crecimiento urbano han tenido un desarrollo explosivo impactando fuertemente el sistema de soporte vital de nuestro planeta, por lo que medir y comprender la relación entre el crecimiento urbano y las tasas de emisiones de gases de efecto invernadero resulta esencial para asegurar la sustentabilidad de los ambientes donde vivirá el 67% de la población mundial en el año 2050. Este artículo busca, por un lado, establecer la posibilidad de evaluar emisiones a partir de fuentes independientes a la fuente emisora y por otro, describir la relación entre emisiones de CO₂ y el tamaño del sistema de ciudades de Chile. Para ello, se caracterizaron las emisiones de CO₂ y sus anomalías para Chile continental utilizando sensores remotos (OCO-2). Se evaluó además la relación bivariada entre emisiones de CO₂ declaradas en los inventarios locales del RETC e indicadores de desarrollo urbano de 20 ciudades chilenas. Si bien es posible estimar las emisiones de CO₂ a partir de sensores remotos a escala regional, la baja de resolución y cobertura espacial de datos válidos capturados por el satélite limita la asociación de emisiones al ambiente urbano en Chile. Sin embargo, los datos declarados en RETC muestran que las emisiones a nivel de ciudad presentan una relación sublineal para las tres variables consideradas: Población ($\beta=0,89$; $r^2=0,73$), Área urbana ($\beta=0,99$; $r^2=0,74$) y PIB ($\beta=0,68$; $r^2=0,55$). Estos resultados coinciden con descripciones en la literatura, y sugieren que las emisiones de CO₂ en ciudades de tamaño creciente está asociada a economías de escala en la que los habitantes de una ciudad comparten los costos de emisión, producto de una mayor eficiencia en el uso de la infraestructura y los servicios a medida que la ciudad crece en población, área y producción. Lo que se traduce finalmente en menores tasas de emisión per cápita.

Palabras Clave: Urbanización; Sostenibilidad; Emisiones; Sistemas Complejos; Escalamiento

Abstract

Spatial observation and analysis of the relationship between atmospheric CO₂ emissions and the size of cities in Chile

Urban growth rates have had an explosive development strongly impacting our planet's life support system. Therefore, measuring and understanding the relationship between urban growth and greenhouse gas emission rates is essential to ensure the sustainability of the urban environment. More so if we acknowledge that 67% of the world's population will live there by 2050. This article seeks, on the one hand, to establish the possibility of evaluating emissions from independ-

1. Universidad Austral De Chile, marxcelantonia@gmail.com2. Laboratorio de Ecoinformática. Instituto de Conservación, Biodiversidad y Territorio. Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales. Universidad Austral de Chile, horacio@ecoinformatica.cl

ent sources and, on the other, to describe the relationship between CO₂ emissions and the size of urban systems in Chile. CO₂ emissions and their anomalies for continental Chile were characterized using remote sensors (OCO-2). The bivariate relationship between CO₂ emissions declared in the local inventories of the Pollutant Emissions and Transfer Registry (RETC in spanish) and urban development indicators of 20 Chilean cities was also evaluated. Although it is possible to estimate CO₂ emissions from remote sensors on a regional scale, the low resolution and spatial coverage of valid data captured by the satellite limits the association of emissions to urban environments in Chile. However, the data declared in RETC show that emissions at the city level present a sublinear relationship for the three variables considered: Population ($\beta=0.89$; $r^2=0.73$), Urban area ($\beta=0.99$; $r^2=0.74$) and GDP ($\beta=0.68$; $r^2=0.55$). These results coincide with descriptions available in the literature, and suggest that CO₂ emissions in cities of increasing size are associated with economies of scale in which urbanites share emission costs, as a result of greater efficiency in the use of infrastructure and services as the city grows in population, area and production. This ultimately translates into lower per capita emission rates.

Keywords: Urbanization; Sustainability; Emissions; Complex Systems; Scaling

1. Introducción

Actualmente, las áreas urbanas albergan a más de la mitad de la población mundial (United Nations, 2012) y se espera que esta proporción aumente al 67% para el 2050 (UN-Habitat, 2013). Producto de su alta densidad de población, las ciudades son reconocidas como centros de conocimiento, creatividad e innovación. Sin embargo, también son responsables de $\frac{3}{4}$ partes de las emisiones de GEI (gases de efecto invernadero) y representan la fuente dominante de emisiones de dióxido de carbono (CO₂). Este es el GEI de mayor importancia por su rol en la regulación del clima sobre la tierra (Hammer et al., 2011) y cuyo incremento en la atmósfera está asociado principalmente a la generación de fuentes de energía y a la transformación de paisajes naturales (Seto y Satterthwaite, 2010; Hutyra et al., 2014).

Las proyecciones de urbanización mundial sugieren que al 2030 la población urbana alcanzaría 1,35 mil millones de personas (United Nations, 2012) ocupando una extensión de más de 1,2 millones de km², equivalente al tamaño de Sudáfrica (Seto et al., 2012). Este crecimiento y urbanización de la mayor parte de la población mundial demandará de una gran cantidad de materia y energía para la construcción y mantenimiento de las funciones urbanas. Además, la generación de desechos, la contaminación de cursos de agua, suelos y las emisiones hacia la atmósfera afectará directamente a la productividad de ecosistemas, con la consecuente pérdida de hábitat, biomasa y almacenamiento de carbono con un gran impacto sobre la biodiversidad y el sistema de soporte vital del planeta (Seto y Satterthwaite, 2010; Hutyra et al., 2014).

Ya en la primera década del presente siglo XXI, el 85% de las necesidades energéticas del mundo son cubiertas por combustibles fósiles (principales emisores de GEI) y se presume que la demanda energética seguirá aumentando, producto del modelo económico actual basado en el crecimiento (Estenssoro, 2010). En este proceso, las áreas urbanas son las principales consumidoras de energía. En donde el tamaño de una ciudad determina el consumo de energía necesaria para mantener las infraestructuras e impulsar las actividades económicas (Luck et al., 2001), aportando así a la generación de mayores tasas de emisiones antropogénicas de GEI. Este proceso de transformación de energía, materiales y sus efectos (i.e. emisiones) en la ciudad ha sido analizado desde los años sesenta bajo el concepto de “metabolismo urbano” (Wolman, 1965). En este es-

fuerzo se han hecho claras analogías con los organismos vivos con importantes contribuciones para profundizar en la comprensión de los fenómenos urbanos que caracterizan a las ciudades y afrontar los desafíos sociales, ambientales y energéticos del próximo siglo (Folke et al., 1997; Decker et al., 2000; Brunner y Rechberger, 2002; Bettencourt et al., 2007).

Para comprender cómo las ciudades están influyendo en el entorno, es esencial entender que ellas no sólo representan lugares o espacios físicos, sino que son finalmente producto de la interacción entre personas y entre éstas con el espacio físico en que se desarrollan. Resulta útil entonces proponer el estudio de las ciudades a partir de la teoría de los sistemas complejos (Batty, 2008; Batty, 2013; Bettencourt, 2013; Fragkias et al., 2013; Gudipudi, 2017; Rybski et al., 2017). Desde esta disciplina, es posible definir a las ciudades como un conjunto de redes con interacciones complejas que surgen de la dinámica por la que sus habitantes e instituciones se relacionan. Esta formalización permite además visualizar el ambiente urbano como una aglomeración emergente. Esto es, una agrupación de individuos cuyas interacciones mediada por procesos no lineales en un espacio físico, social y organizacional adquiere propiedades emergentes imposibles de describir a partir de los procesos individuales que las generan. Estas características de los sistemas urbanos son, por lo demás, comunes a otros *sistemas complejos*, con un funcionamiento que depende de factores sociales, ambientales y de infraestructura, a su vez moldeada por componentes geográficos, culturales y políticos (West, 2017).

Esta aproximación ha puesto en perspectiva la sostenibilidad de los sistemas urbanos, enfatizando en la necesidad de una adecuada comprensión científica de los procesos asociados al crecimiento urbano como de las repercusiones de éste, particularmente la relación entre el tamaño de la población urbana y las emisiones que éstas generan. Con este fin, interesa desarrollar teorías integrales basadas en evidencias empíricas que mejoren la comprensión de la organización y las dinámicas sociales que ocurren en las ciudades. Es esencial, en últimos términos, generar políticas de gestión adecuadas y efectivas que modifiquen las trayectorias de crecimiento, si buscamos reducir los actuales patrones de emisiones urbanas de CO₂ (Bettencourt et al., 2007; Glaeser y Kahn, 2010; Fragkias et al., 2013; Hutry et al., 2014), puesto que hemos superado la capacidad del planeta para mantener las actuales tasas de desarrollo socioeconómico (Goodland, 2003; Brown et al., 2011; Burger et al., 2012). Por lo tanto, la sostenibilidad de los sistemas urbanos depende estrechamente de estas interacciones complejas. Considerar las múltiples e interdependientes facetas que cambian en una amplia gama de escalas (i.e. infraestructura, emisiones, tasas de actividad socioeconómica u otros) requiere el desarrollo de metodologías de análisis que puedan dar cuenta de sus propiedades medias y emergentes. En particular, exige visualizar las ciudades como un conjunto de relaciones comunes a todos los sistemas urbanos, para identificar y jerarquizar los procesos que revelarán a aquellos que gobiernan su dinámica (Louf y Barthelemy, 2014).

Recientemente, varios autores han propuesto abordar el estudio de los sistemas urbanos a partir de una analogía con la ley de Kleiber (Naroll y Von Bertalanffy, 1956; Nordbeck, 1971), una ley de potencia empírica que describe la relación alométrica (i.e. una desviación de la relación isométrica) entre la tasa metabólica de un organismo y su masa (Kleiber, 1947). Aunque sugerida por Pumain en 2004 (Pumain, 2004), esta propuesta es formulada por Bettencourt et al. (2007) con la proposición de que la mayoría de los indicadores urbanos pueden describirse por la siguiente relación de potencia: $Y(t) = Y_0(t)N(t)^\beta$, que transformada a una relación usando logaritmos es: $\log Y(t) = Y_0(t) + \beta \log N(t)$. Aquí, $Y(t)$ y $N(t)$ representan el indicador o propiedad urbana (e.g. emisiones urbanas de CO₂) y el tamaño de la ciudad, medido por su número de habitantes, en un tiempo t . $Y_0(t)$ es una constante de normalización y el exponente β , también llamado elasticidad,

caracteriza la naturaleza de la relación. Según esta propuesta, es posible clasificar la elasticidad en 3 regímenes, donde:

- $\beta < 1$, representa una condición en que el indicador urbano crece a medida que lo hace el tamaño de la ciudad siguiendo un régimen sublineal, llamado *economía de escala* en economía. Bettencourt et al. (2007) proponen que, en analogía con el escalamiento metabólico en organismos, esta situación deriva usualmente de un proceso de optimización que aumenta la eficiencia asociadas a la infraestructura a gran escala y los servicios (e.g. superficie ocupada por carreteras, longitud del cableado eléctrico, etc). Esto redundaría en que en ciudades de mayor tamaño se requiere un menor número de personas (N) para la propiedad urbana estudiada (e.g. emisiones de CO_2), pues el costo de producir dicha propiedad es compartido entre los individuos (N) lo que se traduce en una mayor eficiencia; un comportamiento deseable cuando la propiedad urbana en estudio resulta ser las emisiones antropogénicas de CO_2 ;
- $\beta > 1$, representa un régimen superlineal donde se produce un exceso de la propiedad urbana, asociado a la naturaleza intrínsecamente social de las ciudades y no tiene equivalente en biología (Bettencourt et al., 2007). Aquí el crecimiento del indicador experimenta un aumento per cápita con el tamaño de la población. Esto se traduce en una mayor productividad y calidad de vida (e.g. desarrollo tecnológico, ingresos, conocimiento y creatividad, etc.) (Pumain et al., 2006); y finalmente,
- $\beta \cong 1$, donde se describe un régimen lineal, isométrico, asociado con las necesidades individuales de las personas y representa un aumento proporcional y constante de los indicadores urbanos con la población (e.g. número de trabajos, viviendas, consumo de agua, etc.)

Esta aserción no ha estado exenta de críticas, las principales pueden asociarse a 3 tipos de argumentos, el primero de ellos, está relacionado con la dificultad para identificar la unidad mínima de estudio y abordar la naturaleza de los espacios urbanos. En efecto, resultados recientes muestran una significativa variabilidad del exponente de escalamiento según el criterio usado para definir el límite urbano. Este argumento tiene particular relevancia al momento de definir las fronteras ficticias usualmente aplicadas a, por ejemplo, la población mínima requerida para clasificar como urbana una aglomeración de población en el caso de los países subdesarrollados o como un espacio funcional con interacciones económicas relevantes, como sucede en países desarrollados de Europa (Oliveira et al., 2014; Arcaute et al., 2015; Cottineau et al., 2017). El segundo tipo de argumento invoca dificultades puramente estadísticas para identificar inequívocamente el régimen de escalamiento. La existencia de distintas maneras de modelar el error en la estimación de la relación, exponen cierta inconsistencia en los tipos de indicadores y su régimen de escalamiento, por ejemplo, la asignación de un régimen superlineal a propiedades super-creativas, por tanto, el ajuste del modelo usando el método de mínimos cuadrados no parece ser adecuado para concluir la existencia de una escala diferente a la isométrica (Leitão et al., 2016). El tercero, se asocia a las dificultades para recrear estas relaciones a partir de los datos longitudinales. Este argumento tiene como fundamento la evolución temporal de cada ciudad a medida que crece su población, lo que se vería reflejado en variaciones en el valor del exponente de escalamiento a través del tiempo (Pumain et al., 2006; Depersin y Barthelemy, 2018). Por último, un contraargumento que pareciera fundamental proviene de la literatura económica. En ella se descarta la utilidad del escalamiento urbano, invocando inconsistencias en el supuesto de ortogonalidad entre población e indicador urbano y los agentes que rigen dichos procesos (Thisse, 2014). Esto pareciera tener más relación con diferencias de paradigmas y evidencias diferentes de aproximación entre las dos escuelas de pensamiento: la de economía y la física.

A pesar de esto, es interesante notar que ninguno de estos argumentos niega la existencia de esta relación. Es más, la literatura claramente indica que, cuando estas relaciones empíricas se expresan, les subyace una razón específica y común a todos los componentes del sistema bajo estudio (Barenblatt, 2003; Batty, 2005; Barthelemy, 2016). Sin embargo, queda claro que la existencia de leyes de escalamiento induce a representaciones simplificadas de los sistemas urbanos, que muchas veces omiten aspectos claves de las complejidades económicas que constituyen los sistemas urbanos (Keuschnigg et al., 2019). En la práctica, se ha utilizado como una simplificación extremadamente útil para la comprensión de sistemas biológicos (West y Brown, 2005) lo que ha permitido evaluar las dinámicas de indicadores biológicos y urbanos (Samaniego y Moses, 2008; Alves et al., 2015). Sin embargo, la utilización de estas reglas de escalamiento genéricas para explicar indicadores urbanos ha llevado también a confusión respecto a la forma de aplicar este método para medir el rendimiento de una ciudad en cuanto a, por ejemplo, sus emisiones de CO₂ (Fragkias et al., 2013; Louf y Barthelemy, 2014; Oliveira et al., 2014). Por lo tanto, identificar el régimen correspondiente para explicar indicadores urbanos requiere además de una adecuada conceptualización de ciudad. Así como de datos certeros que sean sometidos a altos estándares científicos, que permitan inferir dinámicas subyacentes en el camino hacia el desarrollo sostenible de las ciudades (Hutyra et al., 2014).

Los sistemas humanos complejos como las ciudades, así como los países, dependen además de los intercambios con un entorno más amplio, como son las redes de comercio y comunicación que integran la economía global. Esta dinámica incluye el transporte de personas, organismos, energía, materiales e información, lo que también potencia una mayor producción de desechos más allá de los límites de las ciudades, desafiando aún más la sostenibilidad global (Burger et al., 2012). Las redes terrestres de monitoreo de gases de efecto invernadero proporcionan un registro preciso de la acumulación de este gas en la atmósfera, pero muchas veces no tienen la resolución ni cobertura necesaria para identificar y/o cuantificar áreas fuentes y sumideros de CO₂ a escalas regionales, a esto se suma el hecho de que los inventarios de emisiones ascendentes en muchas de las megaciudades del mundo todavía son bastante inciertos, particularmente en los países en desarrollo (Beirle et al., 2011). Para resolver esto, se han perfeccionado las mediciones basadas en el espacio o descendentes. El Observatorio de Carbono en Órbita 2 de la NASA, u OCO-2 es un satélite diseñado para estudiar el ciclo global del carbono con la sensibilidad, precisión, resolución y cobertura necesarias a escalas regionales. Esto representa, sin duda, un aporte para el monitoreo del CO₂ y otros GEI, que debiera permitir clarificar la dinámica del CO₂ en el actual escenario de cambio climático (Frankenberg et al., 2014; Crisp, 2015; Hakkarainen et al., 2016; Nassar et al., 2017). Una combinación de diferentes sistemas de observación (e.g. teledetección, sensores remotos, estudios socioeconómicos, ecosistémicos, etc.) son igualmente necesarios en la detección de fenómenos globales (e.g. aumento en las emisiones de CO₂), la evaluación de su impacto en los ecosistemas, la detección de anomalías y respuestas a las perturbaciones de estos (Duarte et al., 2006). Permitiendo priorizar políticas de sostenibilidad y urbanización que apunten a reducir las emisiones de CO₂ y de otros GEI, haciendo que el uso de la energía urbana sea más sostenible (Rosales y Worrell, 2018).

Finalmente, en este mismo escenario, los gobiernos han enfocado sus esfuerzos en limitar las emisiones de éste y otros GEI por medio de acuerdos internacionales como lo fue el Acuerdo de París o COP21 (21ª Conferencia de las Partes) de la CMNUCC (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático) celebrada en noviembre de 2015, donde más de 150 naciones se comprometieron de forma voluntaria a ratificar el acuerdo con el objetivo de tomar medidas para limitar el aumento de la temperatura media posindustrial por debajo de los 2°C (3,6

grados Fahrenheit) y así evitar impactos irreversibles (CMNUCC, 2015). Chile, como país miembro de la convención, ha desarrollado el INGEI (Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero) a cargo del Comité Nacional de Cambio Climático (creado en 1996 posterior a la cumbre de Río de Janeiro) con objeto de informar el estado de sus emisiones ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, como el mecanismo principal para evaluar su progreso en cumplimiento de los compromisos adquiridos. Este inventario agrupa a los sectores económicos asociados a la generación de emisiones o absorciones de GEI en todo el territorio nacional y forma una base de datos con información periódica sobre las emisiones y transferencias al medio ambiente de contaminantes en el RETC (Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes). Este último registra todas las sustancias químicas potencialmente dañinas, y las clasifica en emisiones de contaminantes desde fuentes fijas o puntuales (e.g. industrias) y fuentes móviles o difusas que en su desplazamiento emiten contaminantes (i.e. transporte). Esto aporta un marco de referencia para el monitoreo del cumplimiento de las normativas, tanto primarias como secundarias vigentes, que permite su monitoreo a través del tiempo. El establecimiento de esta infraestructura de datos de acceso público permite a la vez su análisis para investigación y para mejoras en la gestión y toma de decisiones necesarias para desarrollar lineamientos y/o normativas que mejoren las políticas públicas en materia socioambiental (CONAMA, 2007).

En este documento, examinamos la relación entre el tamaño de la población de las ciudades chilenas y las emisiones de CO₂ utilizando datos del RETC, caracterizamos también la distribución espacial de emisiones de CO₂ en Chile medidas a través de sensores remotos (OCO-2).

2. Metodología

2.1. Extracción y manejo de datos de XCO₂ de OCO-2

Para caracterizar la distribución espacial de las emisiones de CO₂ en Chile a través de sensores remotos, se utilizaron datos de concentración (ppm) de CO₂ (en adelante XCO₂) del Observatorio de Carbono en Órbita 2 u OCO-2. Estos fueron obtenidos desde la plataforma de la Nasa (MIRADOR), donde se descargaron desde los últimos archivos *Lite* reprocesados (7r) desde septiembre 2014 a noviembre 2017. Los datos fueron tratados en R (versión 3.4.4), para seleccionar sólo aquellas observaciones de mayor calidad ($XCO_2_quality\ flags = 0$) y con niveles de advertencia (WL) menores a 15 (0 a 19, los valores bajos indican datos de mayor calidad). Posteriormente en un Sistema de Información Geográfico (Qgis versión 2.18), se creó un *buffer* de ~0,5 grados sobre el límite nacional, para luego eliminar todas las observaciones realizadas por el sensor fuera de este límite. Con la información de XCO₂ ya extraída para el límite definido, se generó una matriz donde se utilizó la metodología desarrollada en Hakkarainen et al. (2016) para aislar áreas de contaminación y caracterizar las anomalías de las emisiones de CO₂ (ppm). Así, se incluyó a la matriz el valor de la anomalía de las observaciones de XCO₂ para los 4 años, calculada a partir de la mediana diaria descontada a las observaciones individuales como se expresa en la siguiente ecuación:

$$XCO_2\ (anomalía) = XCO_2\ (individual) - XCO_2\ (mediana\ diaria)$$

De esta forma se logra simultáneamente desestacionalizar y eliminar las tendencias existentes en los datos, reduciendo también el efecto de la distribución espacial de los sondeos y los sesgos asociados a la escala regional, por ejemplo, la latitud. Para la representación espacial de las observaciones individuales, se utilizaron cuadrículas con diferente resolución: una de 50X50 km

para un análisis general a nivel de región (i.e. Chile continental) y una de 25X25 km, resolución más fina que permite identificar áreas de emisión aisladas (e.g. ciudades). A estas cuadrículas se superpuso la capa de límites censales de 2017 de las principales ciudades chilenas para su respectiva identificación espacial. Por último, se eliminaron las celdas de la cuadrícula cuyo número de sondeos de OCO-2 dentro de esta fuera menor de 10, para así representar mejor las mediciones realizadas por OCO-2 y promediar el valor de las anomalías (>10 sondeos) por cada cuadrícula.

2.2. Extracción y manejo de datos de sistemas de observación locales

Para analizar las emisiones de CO₂ provenientes del RETC y su relación de escalamiento con el tamaño de las ciudades chilenas, se generó una base de datos con diferentes variables resumidas en el Tabla 1. Para iniciar, se tomó la capa de áreas censales del país correspondientes al censo de 2017; esta capa contempla los espacios urbanizados por comuna, que fueron conectados entre sí para conformar las conurbaciones, definidas por el Observatorio Urbano del MINVU (Ministerio de Vivienda y Urbanismo). A esto se sumaron los datos de población a cada ciudad mayor a 10 000 habitantes, según el censo de población de 2017 (INE, 2017) y la respectiva proporción del PIB (Producto Interno Bruto) regional, obtenido desde la plataforma del Banco Central de Chile para los 3 años. Siguiendo a ello, se agregaron las emisiones *in situ* (ton/año) declaradas por las ciudades según el RETC para los años 2014, 2015 y 2016, que incluye valores de emisiones desde fuentes puntuales para 119 ciudades y desde fuentes difusas por transporte en ruta para 21 ciudades, así como las correspondientes al consumo residencial de leña para 118 ciudades.

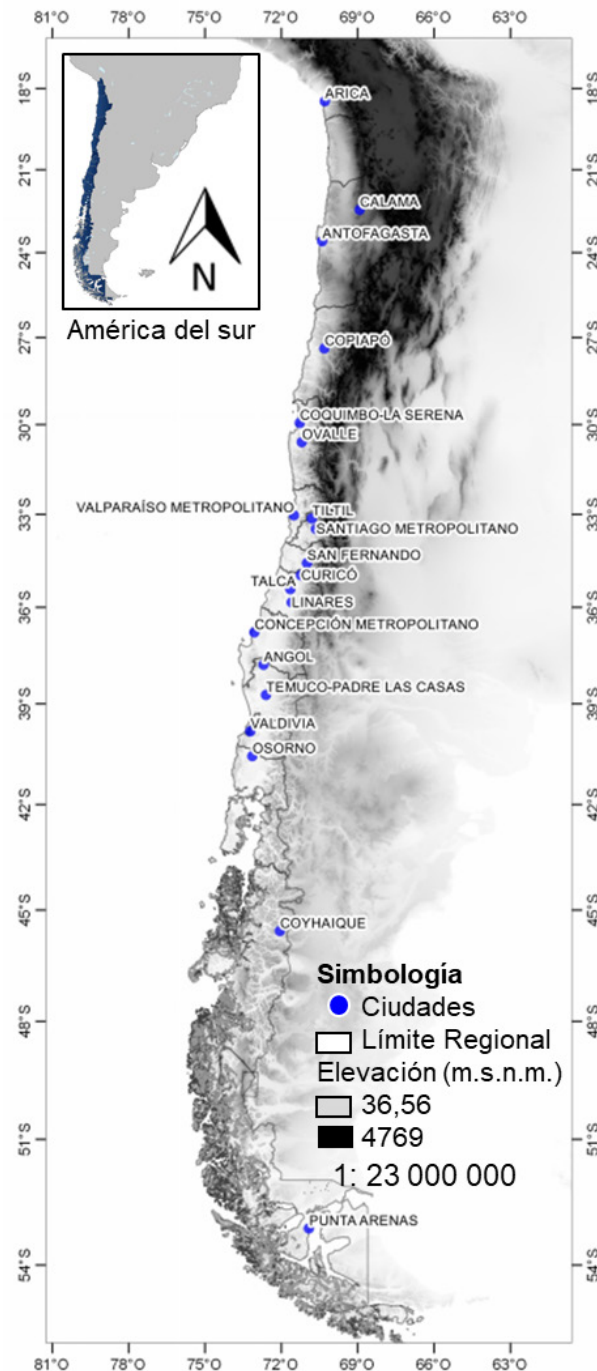
Tabla 1. Resumen de variables en estudio.

Descriptores de las ciudades	Unidad	Valores de emisiones de CO ₂	Unidad
Población	individuos	Ton/año	Ton/año
Área	km ²	XCO ₂ (media de las anomalías)	ppm
PIB	\$ (miles de millones de pesos)	Sondeos	Unidad

Fuente: elaboración propia

Con esta información, se evaluó la relación entre emisión y tamaño (i.e. medido por su población). Siguiendo procedimientos estándar en la literatura, se construyeron modelos lineales de regresión, mediante la evaluación de MCO (mínimos cuadrados) para determinar la ecuación de la recta luego de transformar la ecuación de escalamiento a una de forma lineal usando logaritmos en base 10: $\log Y(t) = Y_0 + \beta \log N(t)$. Esto permitió evaluar los parámetros de la relación de escalamiento, es decir, la pendiente (β) que expresa las reglas dinámicas generales que funcionan en todo el sistema urbano, en este caso las emisiones de CO₂ ($Y(t)$) y los 3 índices de desarrollo urbano: Población, área y/o PIB ($N(t)$). Se realizó un análisis general con la suma de las emisiones de las 3 fuentes emisoras para 20 ciudades: Angol (ANG), Antofagasta (ANT), Arica (ARI), Calama (CA), Concepción Metropolitano (CM), Copiapó (COP), Coquimbo-La Serena (COQSER), Coyhaique (COY), Curicó (CUR), Linares (LIN), Osorno (OSO), Ovalle (OVA), Punta Arenas (PA), San Fernando (SFR), Santiago Metropolitano (SM), Temuco-Padre Las Casas (TEM), Til Til (TIL), Talca (TNC), Valdivia (VAL), Valparaíso Metropolitano (VM) (Figura 1). Siguiendo a ello se realizaron análisis de escalamiento individuales por cada fuente emisora: emisiones puntuales, emisiones difusas por transporte y difusas por consumo de leña residencial.

Figura 1. Localización de las ciudades chilenas en estudio.



Fuente: elaboración propia.

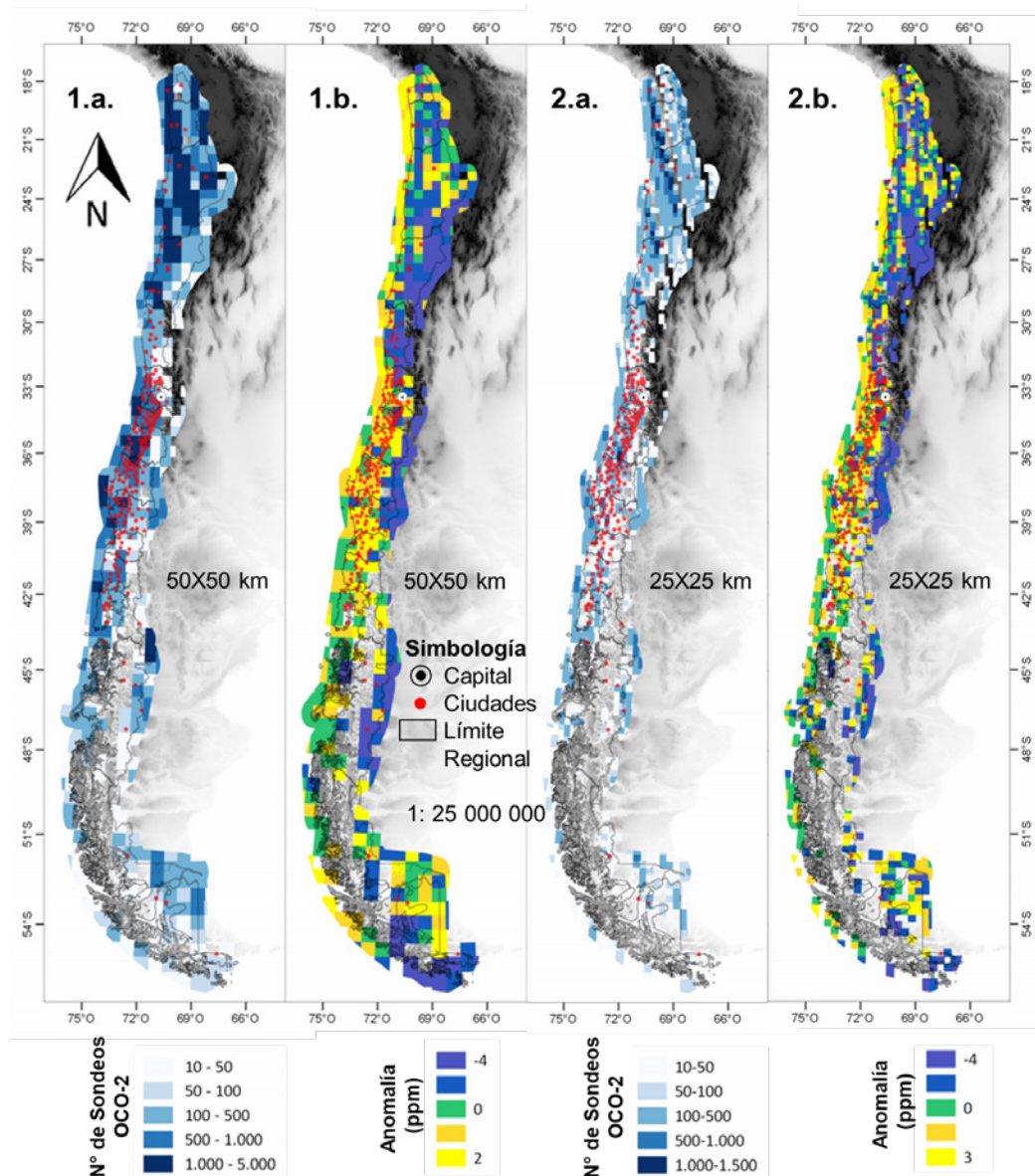
Todos los análisis estadísticos se realizaron en *R* (versión 3.4.4). Un análisis de regresión por cuantiles (τ) permitió evaluar la hipótesis que explicita una cota superior o inferior, respecto del tamaño, PIB y área para aquellas regresiones con bajo coeficiente de determinación ($r^2 < 0,5$). Para esto se usó la librería *Quantreg*. Las variables dependientes con bajo coeficiente de determinación fueron: emisiones desde fuentes puntuales y emisiones difusas por consumo de leña residencial. En estas últimas, se evaluaron 119 y 118 ciudades respectivamente. Así, el análisis de regresión por cuantiles permitió evaluar la existencia de diferencias significativas con los resultados obtenidos por mínimos cuadrados.

3. Resultados

3.1. Caracterización de emisiones de CO₂ desde sensores remotos

La Figura 2 muestra la caracterización de las emisiones de XCO₂ a lo largo del país utilizando sensores remotos (OCO-2), acompañado de la distribución del número de sondeos capturados por el satélite para una resolución gruesa (50X50 km) y una resolución fina (25X25 km). Se representó la distribución de las emisiones capturadas por OCO-2 entre 2014-2017 a lo largo de Chile continental con sus respectivos valores de anomalías medias de XCO₂ (ppm) en las Figuras 2, 1.b y 2.b. Los tonos de color naranja-amarillo resaltan las áreas más contaminadas (anomalías positivas), predominante en la zona centro y sur del país, donde además se concentra la mayor parte de los centros urbanos (puntos rojos) y en menor medida en la zona norte respectivamente.

Figura 2. 1.b. y 2.b. representan las anomalías de XCO₂ de OCO-2, 2014-2017 y 1.a. y 2.a. la cantidad de observaciones disponibles de OCO-2.

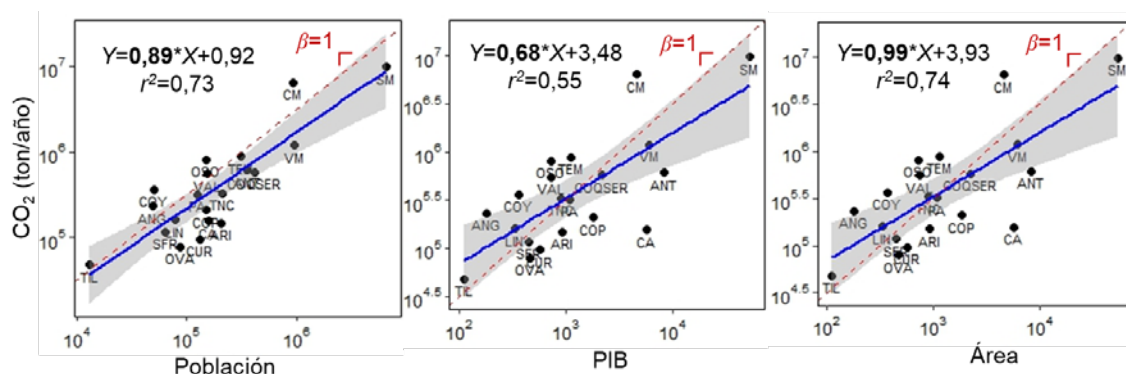


Fuente: elaboración propia

3.2. Caracterización y análisis de emisiones de CO₂ ascendentes: Escalamiento Urbano

Los datos de la suma de las emisiones de CO₂ de fuentes puntuales y difusas provenientes del RETC (2014-2016) para 20 ciudades en la Figura 3, muestran relaciones de ley de poder que escalan de forma sublineal (i.e. $\beta < 1$) con la población ($\beta=0,89$; $r^2=0,73$), con el PIB ($\beta=0,68$; $r^2=0,55$) y una relación marginalmente sublineal con el indicador área ($\beta=0,99$; $r^2=0,74$). La Tabla 2 detalla la síntesis del análisis de regresión.

Figura 3. Escalamiento urbano de las emisiones de CO₂ totales desde fuentes Puntuales y Difusas (2014-2016)



Fuente: elaboración propia.

La cuadrícula más gruesa de 50X50 km permite caracterizar las emisiones a nivel regional, pero hace difícil aislar áreas más pequeñas de emisión como las áreas urbanas de Chile donde el 97% de las ciudades en estudio no superan los 100 km² y las áreas urbanas más grandes están dadas por las conurbaciones de Concepción Metropolitano (247 km²), Valparaíso Metropolitano (287 km²) y finalmente Santiago Metropolitano (906,5 km²). También se puede apreciar que, en latitudes inferiores a los 40°S, la cantidad de observaciones disponibles de OCO-2 disminuyeron fuertemente por lo que los mapas presentan celdas de cuadrícula vacías. Estas últimas aumentan al ampliar la resolución espacial a 25X25 km en la Figura 2, 1.a. y 2.a., haciendo que se pierda importante información.

Tabla 2. Resumen del análisis de regresión paso a paso entre las emisiones de CO₂ del RETC y los 3 indicadores de desempeño urbano, el análisis completo se incluye en el material complementario.

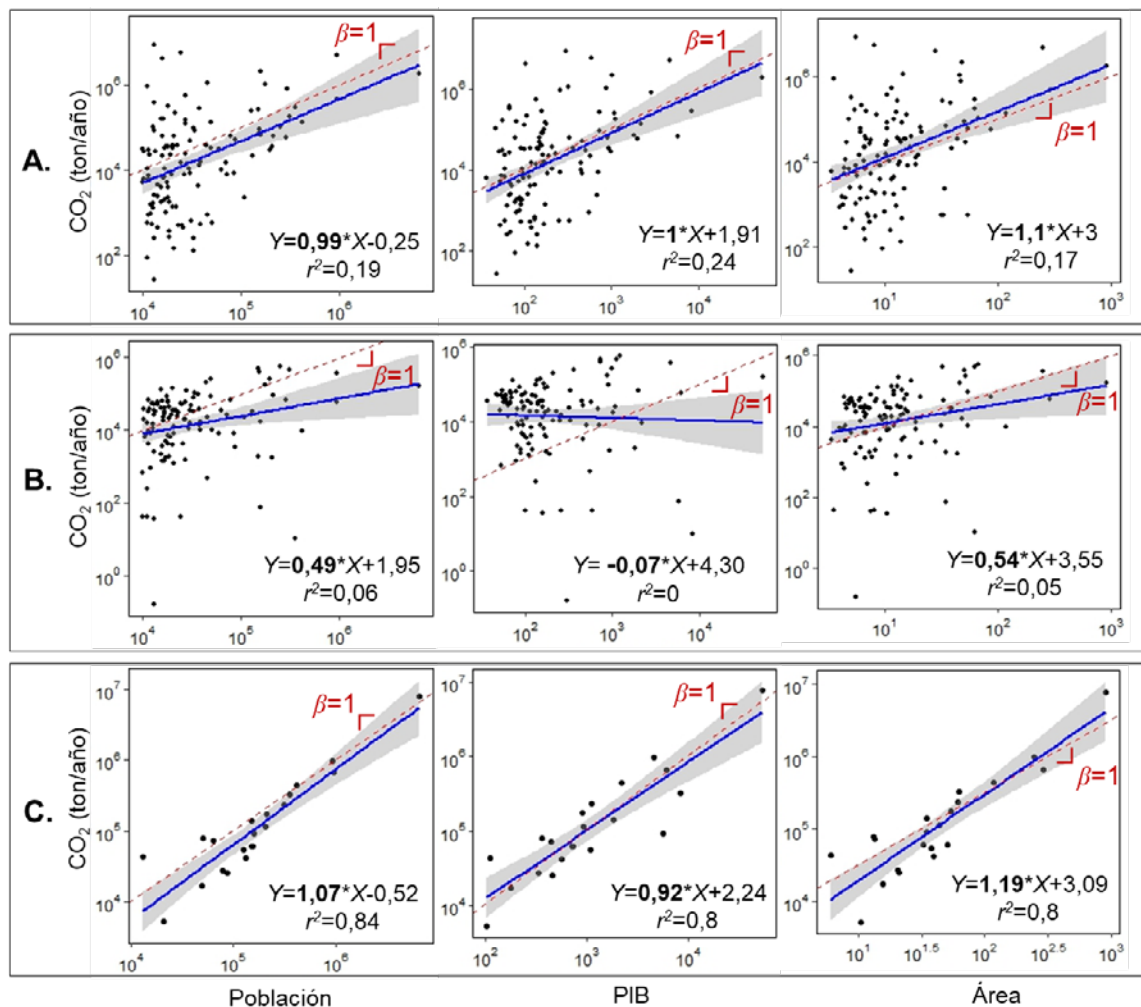
CO ₂ (ton/año)	β	IC 95% (β)	r ²	t-test	g.l.	p	Ajuste de bondad
Emisiones Totales							
Intercepto	0,92			1,38	19	0,183	
Población	0,89	0,62-1,15	0,73	7,04	19	1,43e-06***	$F_{(1,18)}=49,62$; $p=1,43e-06$ ***
Intercepto	3,48			7,6	19	5,07e-07***	
PIB	0,68	0,37-0,98	0,55	4,66	19	0,0002***	$F_{(1,18)}=21,69$; $p=0,0002$ ***
Intercepto	3,93			16,42	19	2,82e-12***	
Área	0,99	0,70-1,28	0,74	7,17	19	1,12e-06***	$F_{(1,18)}=51,42$; $p=1,12e-06$ ***

IC= Intervalos de Confianza; Códigos de significancia: 0 “***” 0,001 “**” 0,01 “*” 0,05 “.” 0,1 “.” 1

Fuente: Elaboración propia

Al separar el análisis de escalamiento por fuentes de emisión en el Figura 4, estas reflejaron relaciones que varían entre la sublinealidad y la linealidad para los 3 indicadores de desempeño urbano; para fuentes puntuales de 119 ciudades: la población es marginalmente sublineal ($\beta=0,99$; $r^2=0,19$), el PIB aparece claramente con una relación isométrica ($\beta=1$; $r^2=0,24$) y el área marginalmente superlineal ($\beta=1,1$; $r^2=0,17$), mientras que para las emisiones de fuentes difusas por consumo de leña residencial de 118 ciudades, las relaciones aparecen como sublineales: población ($\beta=0,49$; $r^2=0,06$), PIB ($\beta=-0,07$; $r^2=0$) y área ($\beta=0,54$; $r^2=0,05$). Finalmente, las emisiones de fuentes difusas por transporte en ruta de 21 ciudades mostraron relaciones mixtas: población ($\beta=1,07$; $r^2=0,84$), PIB ($\beta=0,92$; $r^2=0,8$) y área ($\beta=1,19$; $r^2=0,8$). El análisis de regresión completo se incluye en el material complementario.

Figura 4. Escalamiento urbano de las emisiones de CO₂ (Log10) de fuentes emisoras individuales: A. Fuentes Puntuales, B. Fuentes Difusas por consumo de leña residencial y C. Difusas por transporte (2014-2016).

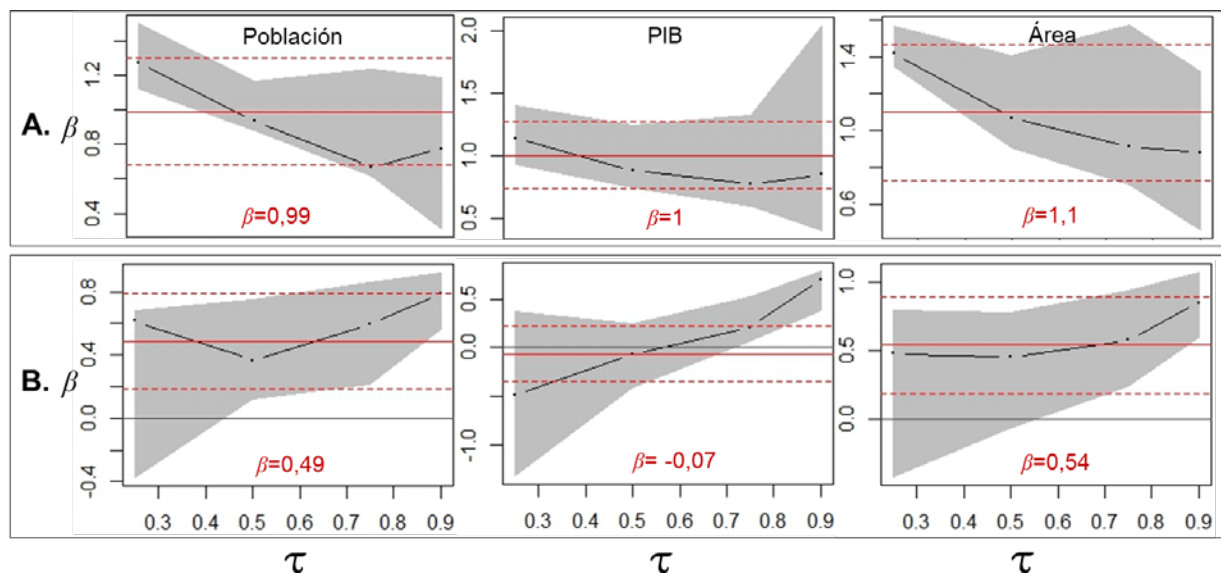


Fuente: elaboración propia

Las fuentes puntuales y difusas por consumo de leña residencial son las menos claras, pues mostraron valores bajos en sus coeficientes de determinación ($r^2 < 0,5$) para los 3 predictores (población, PIB y área). El análisis por cuantiles (τ) en la Figura 5 mostró β distintos para cada cuantil en los 3 índices de desarrollo urbano. Sin embargo, estas diferencias no fueron significativas

cuando se comparan con el coeficiente de regresión por mínimos cuadrados (MCO) correspondiente, y sus límites de confianza (línea roja y punteada). Para el primer caso, las emisiones puntuales; en población como predictor, uno de los coeficiente de regresión estimado para el cuantil ($\beta_{\tau(0,75)}=0,67$), se diferenció significativamente del valor obtenido por MCO ($\beta=0,99$), mientras que para PIB y área ninguno de los coeficientes de los cuantiles se diferenció significativamente de los valores obtenido por MCO ($\beta=1$) y ($\beta=1,1$) respectivamente. Para el segundo caso, las emisiones difusas por consumo de leña residencial; en población uno de los coeficiente de regresión estimado para el cuantil ($\beta_{\tau(0,9)}=0,79$), se diferenció significativamente del valor obtenido por MCO ($\beta=0,49$), para PIB dos de los coeficientes de regresión estimados para los cuantiles: ($\beta_{\tau(0,25)}=-0,48$) y ($\beta_{\tau(0,9)}=0,7$), se diferenciaron significativamente del valor obtenido por MCO ($\beta=-0,07$). En el caso del indicador área, no presento diferencias significativas con el valor obtenido por MCO ($\beta=0,54$) en ninguno de los cuantiles. El detalle del análisis estadístico también se incluye en el material complementario.

Figura 5. Análisis por cuantiles (τ) realizado a las distribuciones: A. Fuentes puntuales y B. Fuentes difusas por consumo de leña residencial. Cada punto representa un cuantil junto a su banda de confianza (gris) y la línea roja representa el valor de β obtenido por MCO junto a sus límites de confianza (línea roja punteada).



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. Análisis de regresión por cuantiles entre fuentes emisoras de CO₂ puntuales y difusas-consumo de leña residencial (variable dependiente) y los 3 índices de desarrollo urbano: Población, PIB y Área (variables explicativas)

CO ₂ (ton/año)	tau=0,25	tau=0,50	tau=0,75	tau=0,90
Emissiones Puntuales				
Intercepto	-2,18 [-3,25- -1,5]	-0,04 [-144-0,27]	1,75 [-0,16-2,01]	1,98 [0,36-4,24]
	p=0,00	p=0,95	p=0,06	p=0,16
$\beta_{\tau_{\text{Población}}}$	1,27 [1,12-1,5]	0,94 [0,88-1,16]	0,67 [0,62-1,24]	0,77 [0,31-1,18]
	p=0,00	p=0,00	p=0,00	p=0,01
Intercepto	1 [0,26-1,23]	2,17 [1,53-2,56]	3,03 [1,79-3,51]	3,6 [1,04-4,85]
	p=0,01	p=0,00	p=0,00	p=0,00
$\beta_{\tau_{\text{PIB}}}$	1,14 [0,93-1,4]	0,87 [0,75-1,24]	0,77 [0,59-1,32]	0,85 [0,4-2,04]
	p=0,00	p=0,00	p=0,00	p=0,01
Intercepto	2,07 [1,8-2,3]	3,12 [2,54-3,22]	3,82 [3,13-4,12]	4,57 [3,78-5,22]
	p=0,00	p=0,00	p=0,00	p=0,00
$\beta_{\tau_{\text{Área}}}$	1,42 [1,35-1,56]	1,06 [0,91-1,41]	0,91 [0,71-1,58]	0,88 [0,45-1,32]
	p=0,00	p=0,00	p=0,00	p=0,01
Emissiones Difusas – Consumo de leña residencial				
Intercepto	1,04 [0,6-3,45]	2,73 [0,89-3,94]	2,12 [0,95-3,78]	1,48 [0,89-2,74]
	p=0,48	p=0,00	p=0,01	p=0,00
$\beta_{\tau_{\text{Población}}}$	0,61 [-0,38-0,68]	0,37 [0,13-0,75]	0,59 [0,22-0,86]	0,79 [0,57-0,92]
	p=0,06	p=0,05	p=0,00	p=0,00
Intercepto	4,85 [2,88-6,34]	4,56 [3,67-5,19]	4,30 [3,73-4,49]	3,53 [3,37-4,13]
	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000
$\beta_{\tau_{\text{PIB}}}$	-0,48 [-1,32-0,37]	-0,07 [-0,41-0,25]	0,21 [0,08-0,52]	0,7 [0,39-0,79]
	p=0,35	p=0,77	p=0,22	p=0,00
Intercepto	3,29 [2,7-3,83]	3,87 [3,61-4,47]	4,18 [3,93-4,54]	4,15 [4,05-4,42]
	p=0,00	p=0,00	p=0,000	p=0,00
$\beta_{\tau_{\text{Área}}}$	0,48 [-0,42-0,8]	0,45 [-0,06-0,78]	0,58 [0,24-0,94]	0,85 [0,60-1,08]
	p=0,16	p=0,05	p=0,01	p=0,00
Banda de Confianza [inferior - Superior] método Rank				

Fuente: elaboración propia

4. Discusión

En este trabajo caracterizamos la distribución espacial de las emisiones de CO₂ (ppm) en Chile a través de sensores remotos (OCO-2) a la vez que examinamos la relación entre el tamaño de la población, un indicador de la producción y la superficie de las ciudades con las emisiones de CO₂ (ton/año) utilizando los inventarios del Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes.

Nuestro análisis hace evidente que la escala es determinante a la hora de trabajar con datos espaciales. A una escala gruesa es posible identificar aquellas macrozonas de mayores emisiones antropogénicas de CO₂ donde se concentra también la mayor parte de los centros urbanos ubicados en la zona centro y sur del país (Figura 2). Sin embargo, la baja resolución espacial de los sondeos capturados por OCO-2, junto a la baja cobertura espacial de datos válidos capturados por este satélite limita la asociación de emisiones a las ciudades de Chile. Algunos autores como Nassar et al. (2017) han probado trabajar con datos de OCO-2 a escala de fábricas individuales, sin embargo, estos autores también señalan profundas limitaciones de este sensor a escala fina. No así para abarcar grandes ciudades como las áreas de emisión antropogénicas aisladas por Hakkarainen et al. (2016) en Europa, EE.UU. y China. Pese a ello, el análisis a macroescala propuesto aquí es necesario si consideramos que limitar la medición al uso directo de la energía dentro de los límites urbanos no considera el impacto global de los GEI producidos por las ciudades al medio ambiente circundante. Esto es en gran medida debido a que la infraestructura de ingeniería urbana es transfronteriza (e.g. el suministro de agua, las refinerías de petróleo, los sistemas de transporte o las centrales generadoras de energías), con importantes impactos fuera del límite urbano y muchas veces superando de manera considerable a las contribuciones realizadas dentro de los límites de una ciudad (Luck et al., 2001; Ramaswami et al., 2012). Por lo que para gestionar mejor las emisiones de CO₂ y otros GEI de origen antropogénico, se requieren mejores herramientas y métodos que cuantifiquen las emisiones en todas las escalas espaciales, tanto a nivel regional como a nivel de ciudades o instalaciones individuales.

El análisis satelital mediante el sensor remoto OCO-2 demostró ser útil como una aproximación regional de las concentraciones de CO₂ en el país, a la vez que ofrece una propuesta metodológica posible de implementar en la próxima generación de mejores sensores para el monitoreo del CO₂. Esto permitirá tener una mejor resolución y cobertura espacial de las concentraciones de dióxido de carbono a escalas más finas como lo son las ciudades chilenas. Un ejemplo de estos es el satélite Sentinel-5 de la Agencia Espacial Europea (ESA) lanzado en octubre de 2017, cuyo objetivo es capturar datos para el monitoreo de contaminantes atmosféricos como el monóxido de carbono (CO), el dióxido de nitrógeno (NO₂), el dióxido de azufre (SO₂), ozono (O₃), metano (CH₄), entre otros a una resolución espacial de 7X7 km. Se espera que estos esfuerzos mancomunados mejoren este y otros estudios sobre nuestra atmósfera.

Los resultados aquí obtenidos a partir de los inventarios del RETC muestran relaciones claras a pesar de las deficiencias en la calidad de los datos (ver coeficientes de determinación). La relación sublineal ($\beta < 1$) entre emisiones urbanas de CO₂ tanto puntuales como difusas con la población, la producción y la superficie de las ciudades (Figura 3), sugiere que las emisiones de CO₂ en ciudades de tamaño creciente en Chile están asociadas a economías de escala. Tal como se describe en Bettencourt et al. (2007), los habitantes urbanos parecieran compartir efectivamente las emisiones a medida que las ciudades crecen en tamaño y se hacen a la vez más productivas económicamente. Esto induce que las emisiones per cápita disminuyan de manera progresiva, lo que en analogía con el metabolismo de los organismos (Kleiber, 1947) muestra que las ciudades más

grandes serían entonces versiones ampliadas de las más pequeñas. Esto siempre que asumamos que los requerimientos energéticos individuales son similares. Consecuentemente, ciudades más grandes se hacen más eficientes al compartir, por ejemplo, transporte público, uso de infraestructura, etc. Algunos han atribuido esto a una mayor intensidad en las interacciones sociales producto de la aglomeración (Schläpfer et al., 2014; Samaniego et al., 2019), lo que incide directamente en una menor cantidad de emisiones per cápita (Bettencourt et al., 2007). Esto refuta la idea de un comportamiento “promedio” entre las emisiones CO_2 y el tamaño poblacional propuesto por Fragkias et al. (2013) y de superlinealidad ($\beta > 1$) de Oliveira et al. (2014) para ciudades de EE.UU.

Examinar las emisiones por cada fuente emisora permite comparar nuestros resultados con los de otros autores como Louf y Barthélemy (2014) quienes identificaron un régimen superlineal entre las emisiones de CO_2 provenientes del transporte y la población. Estos autores, atribuyen este patrón de emisión al monocentrismo y la congestión en ciudades de EE.UU. y países de la OCDE. En el caso de Chile continental, el régimen de emisiones de CO_2 asociadas al transporte en la Figura 4.C, demostró ser isométrica ($\beta = 1$) para los 3 indicadores de desarrollo urbano: población, área y marginalmente sublineal para el PIB, lo que demuestra que aún no hemos alcanzado esos niveles de externalidades, lo que podría indicar que, vivir en grandes ciudades en Chile aún resulta deseable en comparación a las grandes ciudades de EEUU y países de la OCDE. En el caso del producto interno bruto, se demostró que no alcanza la superlinealidad para ninguno de los escenarios expuestos (Figuras 4 y 5). Esto nos da una visión más clara y positiva en cuanto a los efectos que en el medio ambiente significa un aumento en la producción, puesto que mayores índices de producción en países en desarrollo están claramente asociados a mayores tasas de degradación ambiental según la conocida Curva Ambiental de Kuznets o CKA (Oliveira et al., 2014; Zilio, 2015; Rybski et al., 2017), donde cualquier medida de contaminación (e.g. emisiones de CO_2) es plausible de ser utilizada como indicador de degradación ambiental. Aquí, vale la pena mencionar que el PIB si bien escala de forma lineal en un análisis individual con el crecimiento de la población ($\beta = 1,03$; $r^2 = 0,89$), la baja elasticidad entre la alta producción encontrada en las ciudades más grandes en la Figura 3 ($\beta = 0,68$) sugiere que esta se realiza a expensas de una cantidad de emisiones marginalmente menor en comparación con las ciudades más pequeñas. Al igual que los resultados encontrados para área, cuyo valor marginalmente sublineal ($\beta = 0,99$) mostró la influencia de la densidad en el aumento de las emisiones totales, pero con rendimientos decrecientes a escala. Para este comportamiento Ribeiro et al. (2019) reconocen el impacto en las emisiones que induce un aumento en la población y la densidad que aumenta con el área, señalando que los cambios en la población siempre van a tener un mayor efecto sobre las emisiones que los cambios en la densidad.

En este contexto, las grandes ciudades de Chile representan un escenario favorable para reducir las emisiones de CO_2 . Esto se debe, en parte, a que una mayor concentración de personas y el uso de infraestructura a gran escala, ha derivado en un aumento de la actividad económica que ha permitido dar paso a la innovación y eficiencia en el uso de la energía (Fragkias et al., 2013), además de la adopción de políticas ambientales restrictivas (e.g. restricciones vehiculares, restricciones al uso de la leña, etc.). Por ello, las diferentes medidas que han llevado a las grandes ciudades a ser comparativamente más “verdes” pues minimizan impactos ambientales, constituyen una oportunidad para que las pequeñas ciudades tomen ventaja de las ciudades más grandes en el esfuerzo por reducir sus emisiones y así adopten patrones de crecimiento basados en tecnologías y procesos menos contaminantes. Por otra parte, considerar el estudio de otros contaminantes permitirá ofrecer una visión más completa de cómo la concentración de actividades socioeconómicas que requieren de grandes flujos de materia y energía manejan externalidades. Por ejemplo,

la gran cantidad de desechos producto de este metabolismo y su repercusión en la calidad de vida de las personas.

Los datos obtenidos del Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes fueron de utilidad para la caracterización del comportamiento de las emisiones de CO₂ del sistema de ciudades chilenas. Sin embargo, la cantidad de información disponible es claramente una limitante, existiendo vacíos temporales y por cada fuente emisora. Esto obliga a reducir dramáticamente la muestra estadística para poder integrar todas las fuentes que componen la dinámica de emisiones de las ciudades. Por otro lado, las relaciones bivariadas en los análisis de escalamiento por cada fuente emisora en la Figura 4, revelan una importante falta de homocedastidad de los datos para evaluar las emisiones provenientes de fuentes puntuales y de fuentes difusas por consumo de leña residencial (Figura 4. A y B). Los cuales debieron ser sometidos a un análisis estadístico más minucioso para poder detectar diferencias significativas en los cuantiles de las distribuciones por fuente emisora de la Figura 5. Esto puede estar asociado a una falta de estandarización en los métodos de estimación usados para generar la información oficial de emisiones, como, por ejemplo, el balance de materiales y/o factores de estimación, para lo cual cada organismo sectorial (e.g. Ministerio de Salud, INE, Autoridad Sanitaria RM y Secretaria de Planificación de Transporte para contaminantes atmosféricos) se encarga de determinar la validez de la información reportada al RETC según la Comisión Nacional de Medio Ambiente (2007).

Finalmente, la definición de ciudad vuelve a tener importancia al detectarse sesgos asociados a la atribución de valores de emisión a las áreas censales que conforman las conurbaciones. Estas al igual que las ciudades son definidas por el MINVU, donde en el proceso de cruzar la información de emisiones del RETC con la de población urbana del último censo en su respectiva área censal, se aprecia claramente a nivel espacial que no se está capturando la complejidad propia de las interacciones socioeconómicas entre ciudades (e.g. trayectorias de desplazamiento). Este es el caso de la región de Valparaíso donde están definidas entre otras, las dos conurbaciones de El Quisco-El Tabo-Algarrobo, San Antonio-Cartagena y Santo Domingo; espacialmente todas estas áreas conurbadas son colindantes, lo que dificulta asociar interacciones reales entre urbanitas al analizarlas de forma individual. Otro caso es el de Los Andes-San Esteban y San Felipe en la misma región y otras ciudades a lo largo de Chile. Esto exige una actualización en la definición de ciudad dada por parte del MINVU con foco en su funcionalidad que capture parte de la complejidad de las ciudades más allá de los límites administrativos definidos. Esto permitirá asociar información de manera más eficiente para una planificación urbana más efectiva. Por ejemplo, las áreas urbanas deben estar ubicadas más allá de la distancia de desplazamiento de grandes áreas metropolitanas como Santiago Metropolitano o Valparaíso Metropolitano, para evitar ser una ciudad satélite de las grandes ciudades (Makido et al., 2012). Se deben considerar también características de forma como la continuidad espacial de los asentamientos que determinarán el límite urbano del rural (Oliveira et al., 2014). Esto resulta clave a la hora de estimar parámetros de escalamiento como hemos hecho aquí ya que el exponente alométrico resulta ser particularmente sensible a las definiciones del límite urbano (Oliveira et al., 2014; Arcaute et al., 2015; Cottineau et al., 2017). Pese a esto, las relaciones de escalamiento podrían ayudar a prever muchas de las propiedades que se espera que una ciudad exhiba, en promedio a medida que gana o pierde población. Lo que aportara medidas más precisas de los éxitos y fracasos de las gestiones y políticas locales adoptadas en la configuración de las ciudades para cumplir sus metas en materia socioambiental como lo es la Comisión Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático (2015).

5. Conclusiones

Gran parte de la población mundial vive hoy en ciudades, demandando gran cantidad de recursos e impactando de manera considerable el soporte vital de nuestro planeta. Esto hace urgente modificar las trayectorias actuales de crecimiento con miras a un desarrollo sustentable. Para ello, resulta clave entender el rol de nuestras ciudades en el actual escenario de cambio climático. La exploración al uso de datos de emisiones capturados por el Observatorio de Carbono en Órbita 2 de la NASA para Chile, deja una ventana abierta a la continuidad de este trabajo a la espera de un mayor desarrollo en los sistemas de monitoreo de CO₂. Esto último, debiera permitir contar con una mejor resolución y cobertura espacial de concentraciones de CO₂ y a escalas más finas para evaluar el efecto del desarrollo urbano de las ciudades de Chile. En este artículo investigamos el efecto del tamaño, área y PIB de las ciudades sobre las emisiones de CO₂ en el sistema de ciudades chilenas. Encontramos relaciones de escala sublineal ($\beta < 1$) entre las emisiones de CO₂ y los 3 indicadores de desarrollo urbano, lo que sugiere que existe hoy una menor emisión per cápita a medida que crece el tamaño urbano en Chile. Este escenario coincide con la literatura y significa que los habitantes comparten los costos de emisión a medida que la ciudad crece en población, área y producción económica, haciendo que las ciudades más grandes sean más eficientes en emisiones per cápita que las más pequeñas. El uso de diferentes sistemas de observación como los demostrados en este artículo con sus alcances y limitaciones, en combinación representan un proxy para el desarrollo de una poderosa herramienta para el monitoreo de nuestra atmósfera en cuanto a las emisiones de origen antrópico, que permitan guiar a las ciudades a un desarrollo más sustentable.

6. Agradecimientos

Investigación parte del trabajo de tesis de magíster en Ecología Aplicada de la Universidad Austral de Chile de MS. Agradecemos el financiamiento a Proyecto FONDECYT #1161280 (Comisión Nacional de Ciencias y Tecnología, CONICYT Chile). Agradecemos también a Reinhard Kückes por su ayuda en parte del análisis espacial.

7. Bibliografía

- Alves, L. G. A., Mendes, R. S., Lenzi, E. K., & Ribeiro, H. V. (2015). "Scale-adjusted metrics for predicting the evolution of urban indicators and quantifying the performance of cities". *PLoS ONE*, 10(9), e0134862. Doi: 10.1371/journal.pone.0134862
- Arcaute, E., Hatna, E., Ferguson, P., Youn, H., Johansson, A., & Batty, M. (2015). "Constructing cities, deconstructing scaling laws". *Journal of the Royal Society Interface*, 12(102), 20140745. Doi: 10.1098/rsif.2014.0745
- BANCO CENTRAL DE CHILE. Producto interno bruto regional. Recuperado de <https://www.bcentral.cl/pib-regional>. [consulta: 10 de mayo de 2018].
- Barenblatt, G. I. (2003). *Scaling*. Cambridge: University Press.
- Barthelemy, M. (2016). *The structure and dynamics of cities: Urban data analysis and theoretical modeling*. Cambridge: Cambridge University Press. Doi: 10.1017/9781316271377
- Batty, Michael. (2005). *Cities and Complexity: Understanding Cities with Cellular Automata, Agent-Based Models, and Fractals*. Cambridge: MIT Press.
- Batty, Michael. (2008). The size, scale, and shape of cities. *Science*, 319(5864), 769-771. Doi: 10.1126/science.1151419
- Batty, Michael. (2013). *The New Science of Cities*. Cambridge: The MIT Press.

- Beirle, S., Boersma, K. F., Platt, U., Lawrence, M. G., & Wagner, T. (2011). "Megacity emissions and lifetimes of nitrogen oxides probed from space". *Science*, 333(6050), 1737–1739. Doi: 10.1126/science.1207824
- Bettencourt, L. M. A. (2013). "The origins of scaling in cities". *Science*, 340(6139), 1438–1441. Doi: 10.1126/science.1235823
- Bettencourt, L. M. A., Lobo, J., Helbing, D., Kühnert, C., & West, G. B. (2007). "Growth, innovation, scaling, and the pace of life in cities". *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(17), 7301–7306. Doi: 10.1073/pnas.0610172104
- Brown, J. H., Burnside, W. R., Davidson, A. D., DeLong, J. P., Dunn, W. C., Hamilton, M. J., Mercado-Silva, N., Nekola, J. C., Okie, J. G., Woodruff, W. H., Zuo, W. (2011). "Energetic Limits to Economic Growth". *BioScience*, 61(1), 19–26. Doi: 10.1525/bio.2011.61.1.7
- Brunner, P. H., & Rechberger, H. (2002). "Anthropogenic Metabolism and Environmental Legacies". En: Munn, T., (ed.). *Encyclopedia of Global Environmental Change*. Chichester: Wiley, 54–72.
- Burger, J. R., Allen, C. D., Brown, J. H., Burnside, W. R., Davidson, A. D., Fristoe, T. S., Hamilton, M. J., Mercado-Silva, N., Nekola, J. C., Okie, J. G., Zuo, W. (2012). "The macroecology of sustainability". *PLoS Biology*, 10(6), e1001345. Doi: 10.1371/journal.pbio.1001345
- CONAMA (Comisión Nacional De Medio Ambiente). (2007). *Primer Reporte de Emisiones y Transferencia de Contaminantes en Chile*. Recuperado de http://www.retc.cl/wp-content/uploads/2018/12/Primer_reporte_RETc_2005.pdf. [consulta: 10 de mayo de 2018].
- CMNUCC (Convención Maco De Las Naciones Unidas Sobre Cambio Climático). (2015). *Acuerdo de París sobre cambio climático*, GE.15-21930. Recuperado de <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/spa/109s.pdf>. [consulta: 17 de marzo de 2018].
- Cottineau, C., Hatna, E., Arcaute, E., & Batty, M. (2017). "Diverse cities or the systematic paradox of Urban Scaling Laws". *Computers, Environment and Urban Systems*, 63, 80–94. Doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2016.04.006
- Crisp, David. (2015). "Measuring atmospheric carbon dioxide from space with the Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2)". *Earth Observing Systems XX*, 960702. Doi: 10.1117/12.2187291
- Decker, E. H., Elliott, S., Smith, F. A., Blake, D. R., & Rowland, F. S. (2000). "Energy and material flow through the urban ecosystem". *Annual Review of Energy and the Environment*, 25(1), 685–740. Doi: 10.1146/annurev.energy.25.1.685
- Depersin, Jules, Barthelemy, Marc. (2018). "From global scaling to the dynamics of individual cities". *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(10), 2317–2322. Doi: 10.1073/pnas.1718690115.
- Duarte, C. M., Alonso, S., Benito, G., Dachs, J., Montes, C., Pardo, B. M., Ríos, A., Simó, R., Valladares, F. (2006). *Cambio global: Impacto de la actividad humana sobre el sistema Tierra*. Madrid: Consejo Superior de investigaciones Científicas (CSIC).
- Estenssoro Saavedra, F. (2010). "Crisis ambiental y cambio climático en la política global: un tema crecientemente complejo para América Latina". *Universum*, 25(2), 57–77. Doi: 10.4067/s0718-23762010000200005
- Folke, C., Jansson, A., Larsson, J., & Costanza, R. (1997). Ecosystem appropriation by cities. *Ambio*, 26(3), 167–172.
- Fragkias, M., Lobo, J., Strumsky, D., & Seto, K. C. (2013). "Does Size Matter? Scaling of CO₂ Emissions and U.S. Urban Areas". *PLoS ONE*, 8(6), e64727. Doi: 10.1371/journal.pone.0064727
- Frankenberg, C., O'Dell, C., Berry, J., Guanter, L., Joiner, J., Köhler, P., ... Taylor, T. E. (2014). "Prospects for chlorophyll fluorescence remote sensing from the Orbiting Carbon Observatory-2". *Remote Sensing of Environment*, 147, 1–12. Doi: 10.1016/j.rse.2014.02.007
- Glaeser, E. L., & Kahn, M. E. (2010). "The greenness of cities: Carbon dioxide emissions and urban development". *Journal of Urban Economics*, 67(3), 404–418. Doi: 10.1016/j.jue.2009.11.006
- Goodland, Robert. (2003). "The Concept of Environmental Sustainability". *Annual Review of Ecology and Systematics*, 26(1), 1–24. Doi: 10.1146/annurev.es.26.110195.000245
- Gudipudi, V. R. (2017). *Cities and Global Sustainability: Insights from emission and ecological efficiency*. Tesis Doctoral, University of Potsdam.
- Hakkarainen, J., Ialongo, I., & Tamminen, J. (2016). "Direct space-based observations of anthropogenic CO₂ emission areas from OCO-2". *Geophysical Research Letters*, 43(21), 11,400–11,406. Doi: 10.1002/2016GL070885
- Hammer, Stephen; Kamal-Chaoui, Lamia; Robert, Alexis; Plouin, M. (2011). "Cities and Green Growth: A Conceptual Framework". *OECD Regional Development Working Papers*, 08, 1–141. Doi: 10.1787/5kg0tflmzx34-en

- Hutrya, L. R., Duren, R., Gurney, K. R., Grimm, N., Kort, E. A., Larson, E., & Shrestha, G. (2014). "Urbanization and the carbon cycle: Current capabilities and research outlook from the natural sciences perspective". *Earth's Future*, 2(10), 473–495. Doi: 10.1002/2014EF000255
- INE (Instituto Nacional de Estadísticas). (2017). *Síntesis de resultados del censo 2017*. <http://www.ine.cl>. [consulta: 2 de marzo de 2018]
- Keuschnigg, M., Mutgan, S., & Hedström, P. (2019). "Urban scaling and the regional divide". *Science Advances*, 5(1), eaav0042. Doi: 10.1126/sciadv.aav0042
- Kleiber, M. (1947). "Body size and metabolic rate". *Physiological Reviews*, 27(4), 511–541. Doi: 10.1152/physrev.1947.27.4.511
- Leitão, J. C., Miotto, J. M., Gerlach, M., & Altmann, E. G. (2016). "Is this scaling nonlinear?". *Royal Society Open Science*, 3(7), 150649. Doi: 10.1098/rsos.150649
- Louf, R., & Barthelemy, M. (2014). "How congestion shapes cities: From mobility patterns to scaling". *Scientific Reports*, 4, 5561. Doi: 10.1038/srep05561
- Luck, M. A., Jenerette, G. D., Wu, J., & Grimm, N. B. (2001). The Urban Funnel Model and the Spatially Heterogeneous Ecological Footprint. *Ecosystems*, 4(8), 782–796. Doi: 10.1007/s10021-001-0046-8
- Makido, Y., Dhakal, S., & Yamagata, Y. (2012). "Relationship between urban form and CO₂ emissions: Evidence from fifty Japanese cities". *Urban Climate*, 2, 55–67. Doi: 10.1016/j.uclim.2012.10.006
- MINVU (Ministerio De Vivienda Y Urbanismo). *Indicadores urbanos*. Recuperado de <http://observatoriourbano.minvu.cl/indurb/>. [consulta: 2 de abril de 2018]
- MIRADOR. *Data Access*. Recuperado de <http://mirador.gsfc.nasa.gov/>. [consulta: 2 de marzo de 2018].
- Naroll, Raoul S., Von Bertalanffy, Ludwig. (1956). "The principle of allometry in biology and the social sciences". *General systems yearbook*, 1(2), 76–89.
- Nassar, R., Hill, T. G., McLinden, C. A., Wunch, D., Jones, D. B. A., & Crisp, D. (2017). "Quantifying CO₂ Emissions From Individual Power Plants From Space". *Geophysical Research Letters*, 44(19), 10,045–10,053. Doi: 10.1002/2017GL074702
- Nordbeck, Stig. (1971). "Urban Allometric Growth". *Geografiska Annaler: Serie B, Human Geography*, 53(1), 54–67. Doi: 10.2307/490887.
- Oliveira, E. A., Andrade, J. S., & Makse, H. A. (2014). "Large cities are less green". *Scientific Reports*, 4, 4235. Doi: 10.1038/srep04235
- Pumain, Denise. (2004). "Scaling laws and urban systems". *SFI Working Paper*, 04-02 2, 1–26.
- Pumain, Denise, Paulus, F., Vacchiani-Marcuzzo, C., & Lobo, J. (2006). "An evolutionary theory for interpreting urban scaling laws". *CyberGeo*, (343), 20.
- Ramaswami, A., Weible, C., Main, D., Heikkilä, T., Siddiki, S., Duvall, A., Pattison, A., Bernard, M. (2012). "A Social-Ecological-Infrastructural Systems Framework for Interdisciplinary Study of Sustainable City Systems: An Integrative Curriculum Across Seven Major Disciplines". *Journal of Industrial Ecology*, 16(6), 801–813. Doi: 10.1111/j.1530-9290.2012.00566.x
- RETC. *Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes*. Recuperado de <http://www.retc.cl>. [consulta: 10 de marzo de 2018].
- Ribeiro, H. V., Rybski, D., & Kropp, J. P. (2019). Effects of changing population or density on urban carbon dioxide emissions. *Nature Communications*, 10, 3204. Doi: 10.1038/s41467-019-11184-y
- Rosales Carreón, J., & Worrell, E. (2018). "Urban energy systems within the transition to sustainable development. A research agenda for urban metabolism". *Resources, Conservation and Recycling*, 132, 258–266. Doi: 10.1016/j.resconrec.2017.08.004
- Rybski, D., Reusser, D. E., Winz, A. L., Fichtner, C., Sterzel, T., & Kropp, J. P. (2017). "Cities as nuclei of sustainability?". *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 44(3), 425–440. Doi: 10.1177/0265813516638340
- Samaniego, H., & Moses, M. E. (2008). "Cities as Organisms: Allometric Scaling of Urban Road Networks". *Journal of Transport and Land Use*, 1(1), 21–39. Doi: 10.5198/jtlu.v1i1.29
- Samaniego, H., Franco, M., Sotomayor, B. (2019). The Topology of Communicating across cities in increasing sizes, or the complex task of "Reaching Out" in Larger Cities. In Theories and models of urbanization. En D. Pumain & J. Raimbault (Ed.), *Lecture Notes in Morphogenesis*. Springer

- Schläpfer Markus, Bettencourt Luís M. A., Grauwin Sébastien, Raschke Mathias, Claxton Rob, Smoreda Zbigniew, West Geoffrey B. and Ratti Carlo. (2014). The scaling of human interactions with city size. *J. R. Soc. Interface*, 11, 20130789. Doi: 10.1098/rsif.2013.0789
- Seto, Karen C., & Satterthwaite, D. (2010). "Interactions between urbanization and global environmental change". *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2(3), 127–128. Doi: 10.1016/j.cosust.2010.07.003
- Seto, K. C., Guneralp, B., & Hutyra, L. R. (2012). "Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools". *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(40), 16083–16088. Doi: 10.1073/pnas.1211658109
- Thisse, Jacques-François. (2014). "The New Science of Cities by Michael Batty: The Opinion of an Economist". *Journal of Economic Literature*, 52(3), 805–819. Doi: 10.1257/jel.52.3.805
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, P. D. (2012). *World Urbanization Prospects: The 2011 Revision*. New York: United Nations Publication. Doi: 10.2307/2808041
- UN-Habitat. (2013). *State of the world's cities 2012/2013: Prosperity of cities. State of the World's Cities 2012/2013*. Doi: 10.4324/9780203756171
- West, Geoffrey B. (2017). *Scale: The Universal Laws of Growth, Innovation, Sustainability, and the Pace of Life in Organisms, Cities, Economies, and Companies*. New York: Penguin Press.
- West, Geoffrey B; Brown, James, H. (2005). "The origin of allometric scaling laws in biology from genomes to ecosystems: towards a quantitative unifying theory of biological structure and organization". *Journal of Experimental Biology*, 208(9), 1575–1592. Doi: 10.1242/jeb.01589
- Wolman, A. (1965). "The metabolism of cities". *Scientific American*, 213(3), 178–193.
- Zilio, M. I. (2015). "Curva de Kuznets ambiental: la validez de sus fundamentos en países en desarrollo". *Cuadernos de Economía*, 35(97), 43–54. Doi: 10.1016/s0210-0266(12)70022-5